

doi:10.3799/dqkx.2017.101

裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理研究进展

张烈辉¹, 李成勇², 赵玉龙¹, 吴 锋¹

1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500

2.成都理工大学能源学院, 四川成都 610059

摘要: 裂缝性碳酸盐岩是世界上最重要的油气藏储层类型之一,其渗流机理一直是石油工程的研究难点和热点.随着油气勘探开发的不断深入,许多深层海相裂缝性碳酸盐岩油气藏被发现,现有理论已无法准确表征流体流动规律,亟待进一步发展和完善.基于对现有理论和方法的广泛调研,系统回顾了裂缝性碳酸盐岩油气藏裂缝渗流能力表征、不同介质间流体交换机制以及渗流数学模型等方面,展望了此类油气藏渗流理论今后的发展和研究方向.本文分析结果可以为国内外类似油气藏的高效开发起到指导和借鉴作用.

关键词: 裂缝性碳酸盐岩; 油气藏; 裂缝特征; 渗流机理; 数学模型; 石油地质.

中图分类号: P345

文章编号: 1000-2383(2017)08-1273-14

收稿日期: 2017-03-31

Review on the Seepage Mechanisms of Oil and Gas Flow in Fractured Carbonate Reservoirs

Zhang Liehui¹, Li Chengyong², Zhao Yulong¹, Wu Feng¹

1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2.College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Fractured carbonate reservoir is one of the most important reservoir types in the world, and its flow mechanisms has been a hot but challenging research topic in petroleum engineering. With the deepening exploration and development, many deep fractured marine carbon reservoirs have been discovered. However, the existing theories cannot accurately characterize the fluid flow mechanisms. Based on the extensive investigation on the existing theories and methods, the flow capacity characterization of fractures, the fluid exchange between different porous mediums and the mathematical models are reviewed systematically, and the prospect of future development and researches of flow theory in this kind of reservoir are also presented in this paper. Moreover, the results can be used to guide the development of similar reservoirs around the world.

Key words: fractured carbonate; reservoirs; fractures characterization; percolation mechanism; mathematical model; petroleum geology.

裂缝性碳酸盐岩油气藏由石灰岩或白云岩组成,其岩石结构、物理性质与常规碎屑岩储层差异较大.目前世界上碳酸盐岩油气藏储量占原油总储量的50%以上,碳酸盐岩油气藏产量占世界油气总产量的60%以上.通常碳酸盐岩油气藏裂缝系统较为发育,裂缝是碳酸盐岩油气藏重要的渗流通道和储

集空间.裂缝的发育程度主要影响单井产能和驱油效率,世界上单井日产量超过1000 t/d的油井主要来自裂缝性碳酸盐岩储层.

由于裂缝性碳酸盐岩油气藏成藏过程十分复杂,导致裂缝、溶洞、基质等储集体的发育特征、物性、非均质性、流体分布规律、油气藏类型、开发模式

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.51534006, 51374181); 国家科技重大专项(No.2016ZX05053).

作者简介: 张烈辉(1967—),男,教授,主要从事油气渗流理论、油气藏工程及数值模拟等领域的教学和科研工作.

ORCID: 0000-0001-8970-8512. E-mail: zhangliehui@vip.163.com

引用格式: 张烈辉,李成勇,赵玉龙,等,2017.裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理研究进展.地球科学,42(8): 1273-1286.

和开发动态特征等方面与常规油气藏差异较大(姚军等, 2013; 张翔等, 2016; 韩剑发等, 2017)。裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理虽起源于常规砂岩油气藏渗流理论, 但其研究难度已远远超过常规砂岩油气藏, 目前已成为渗流力学的一个重要学术分支。研究裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理对该类油气藏的有效开发和渗流力学的发展均具有十分重要的意义。

1 天然裂缝渗流能力表征研究进展

1.1 天然裂缝渗流能力研究进展

天然裂缝系统发育是裂缝性碳酸盐岩储层的重要特征, 裂缝系统既是油气藏的储集空间也是流体渗流的主要通道, 因此如何表征流体在天然裂缝系统中的渗流能力对于指导此类气藏的开发具有重要的意义。Louis(1969)根据裂缝相对粗糙度的发育情况, 把裂缝中流体的渗流问题归纳为光滑平板间层流、光滑平板间湍流、粗糙平板间层流、粗糙平板间湍流和极度粗糙平板间湍流这 5 种形式。立方定律作为描述裂缝渗流能力的经典公式(Lomize, 1951), 至从被提出以来就成为表征裂缝渗流能力的基础, 其可靠性被 N-S 方程所验证(Snow, 1969)。随后, 该定律又被学者进一步推广来描述天然裂缝网络渗流(Park *et al.*, 2001):

$$q = \frac{a^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{L}, \quad (1)$$

其中, q 为流体的产量, m^3/s ; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; a 为裂缝开度, m ; Δp 为裂缝两端的压差, Pa ; L 为裂缝的长度, m 。

受局部地应力扰动的影响, 天然裂缝开度在局部范围内会发生变化。针对立方定律假设过于简单化的问题, 国内外学者进行了大量的修正工作。修正方法主要有: 凸起高度修正法、缝宽函数直接修正法、缝宽密度分布函数修正法、裂缝粗糙度系数(JRC)修正法、面积接触率修正法和分形修正法(梁敏, 2010)。Neuzil and Tracy(1981)认为裂缝的开度遵循某种函数规律, 并建立了立方定律修正公式:

$$q = \frac{1}{12\mu} \frac{\Delta p}{L} \int_0^{\infty} a^3 f(a) da, \quad (2)$$

其中, $f(a)$ 为裂缝开度的分布概率密度函数。

随着分形理论在石油工程领域的应用, 不少学者提出介质分形理论来表征裂缝开度和不规则形状, 从而运用耦合立方定律来研究裂缝系统的渗流能力(Elsworth and Goodman, 1986; 谢和平, 1994;

蔡建超等, 2013)。下式为 Yang *et al.*(2014)建立的立方定律分形表达式:

$$q = \frac{(a - 2\bar{h})^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{L}, \quad (3)$$

其中, \bar{h} 是代表性单元上所有凸起颗粒的平均高度, m 。

随着渗流理论的发展, Jeong and Song(2005)发现裂缝中存在非均匀沟槽流动, 而立方定律无法描述流体在此类裂缝中的流动规律。随后, 庄园(2014)、曾凡辉等(2016)采用物模和数模等手段和方法对沟槽流动进行了仿真模拟。

1.2 天然裂缝表面形态表征研究进展

天然裂缝力学性质和导流能力与其表面形态紧密相关。Ruffet *et al.*(1998)应用机械探针式岩面扫描仪, 首次研究了天然裂缝沟槽系统的发育状况。张仕强等(1998)利用光电三维面形自动测量系统研究了沉积岩裂缝的表面形态, 分析了裂缝特征尺度参数与导流能力的关系。常宗旭等(2004)探讨了在应力作用下的裂缝流固耦合渗流问题。Nieto *et al.*(2008)应用激光扫描仪建立了裂缝沟槽系统的三维数值化模型。李莹(2013)通过三维激光扫描装置实现了裂缝形态的数字化成像, 建立了在闭合应力作用下的裂缝导流能力预测模型。夏攻沁(2015)在储层裂缝表面形态特征规律、不同作用力下的裂缝闭合规律及裂缝内流体渗流特征等方面进行了系统研究。车星祥(2016)研究了裂缝剪切滑移、裂缝形态及其对裂缝导流能力的影响, 建立了裂缝剪切滑移导流能力评价模型。吴红军等(2016)利用三维激光扫描仪实现了酸蚀蚓孔量化描述。

1.3 天然裂缝应力敏感效应研究进展

裂缝性油气藏的渗流能力对应力敏感效应较为敏感。随着实验方法的不断进步和设备的改进, 许多学者对裂缝性油气藏的应力敏感效应进行了评价研究。蒋海军和鄢捷年(2000)提出了裂缝性储层应力敏感性试验方法, 通过实验发现裂缝的油相渗透率、水力学开度随有效应力增大呈非线性函数关系变化。张浩等(2004, 2007)利用应力敏感性系数对裂缝样品的应力敏感效应进行了评价, 并研究了裂缝宽度、应力敏感性与渗透率之间的内在联系。杨枝等(2009)研究了裂缝性碳酸盐岩岩样在不同有效应力条件下渗透率和逆向渗透率恢复的变化规律, 分析了裂缝性储层的应力敏感性机理及影响因素。刘之的等(2012)通过对岩心裂缝进行可视化描述, 在弄清裂缝发育特征和产状的基础上, 研究了裂缝的产

状、应力敏感性与物性之间的内在联系。张海勇等(2014)采用巴西试验制备的拉张应力微裂缝岩心开展了应力敏感性试验,同时从裂缝介质变形的机制上定量分析了裂缝性低渗透储层的应力敏感特征,定量解释了裂缝介质的应力敏感特征及其与微裂缝含量、表面粗糙程度等的关系。赵海峰等(2015)采用岩石力学分析及介质串并联模型,建立了应力敏感性储层的尺度模型。张睿等(2016)通过对5种应力敏感公式进行实验和理论对比,建议裂缝性储层应力敏感模型可以采用幂律公式描述。

从目前研究进展来看,裂缝沟槽系统对裂缝渗流能力表征起到了决定性的作用,但目前还没有一套完善的三维应力作用下复杂沟槽系统渗流能力的表征理论,因此下一步研究重点应主要集中在复杂沟槽系统描述与多相、多场耦合下的微观渗流能力表征上。

2 流体交换机制研究进展

目前裂缝性碳酸盐岩油气藏流体交换主要是基于统计方法将细观裂缝流动等效为宏观连续的渗流场,引入表征单元体概念描述不同介质渗流场的宏观表现。裂缝性双重介质一般由基质孔隙和裂缝网络构成。目前描述方法主要分为连续介质型和离散型这两大类流体交换方式。

2.1 流体交换机制物理模拟实验

物理模拟作为研究流体在多孔介质中流动规律的重要手段,可以更加准确和直观地模拟介质间流体的交换规律,而且随着近年来高精度流量和压力测量装置的成功研发,物模结果的可靠性越来越高、应用也越来越广泛。裂缝表面粗糙度、重力和毛管力等因素对介质间流体交换规律的影响实验,以及裂缝、溶洞介质系统的一维和二维物理实验模型已被广泛应用(Firoozabadi and Markeset, 1992; Fourar *et al.*, 1993)。而后,随着有机玻璃和大理石刻蚀和雕刻技术的发展,越来越复杂的物理模型被制作出来用于研究不同润湿性、不同裂缝形态、不同介质组合等复杂结构的储层流体流动和交换规律(杨栋等, 2004; 马立平和李允, 2007; 卢占国等, 2010)。近年来,李俊等(2008)采用可视化渗流物理模型研究了缝洞油藏水驱油规律及提高采收率机理。丁祖鹏等(2013)采用精细粘接造缝技术建立了裂缝三维物理仿真模型,实现了裂缝物性分布、基质物性分布和基质裂缝渗吸耦合参数的定量化分析,揭示了基质一

裂缝之间的渗吸微观机理。韩国庆等(2014)建立了裂缝性油藏可视化水驱油物理模型和物理模拟实验装置。童凯军等(2015)建立了变质岩裂缝性油藏水平井立体开发水驱油实验装置。李文鑫等(2016)研发了真三轴气-固耦合渗流试验系统。

从目前的物理模拟试验研究现状来看,深入研究重点应主要集中在多裂缝系统微观可视化渗流实验平台、裂缝性油气藏复杂结构井三维大物模渗流实验平台的研发上。

2.2 单相流体交换机制

多重介质模型是描述在裂缝性碳酸盐岩储层中流体交换的重要模型。通过假设流体在基质和裂缝中渗流都满足达西定律,在考虑基质孔隙和裂缝网络的流体交换机制基础上,双重介质渗流数学模型被提出(Barenblatt *et al.*, 1960)。随后,不同学者通过将裂缝系统与基质系统简化为不同的正交分布关系与不同性质的模型,相继提出了纯裂缝正交模型(Warren and Root, 1963)、平板双重介质模型(Kazemi *et al.*, 1976)、球状双重介质模型(de Swaan, 1976)和柱状双重介质模型(Kazemi *et al.*, 1976)。根据储层基质系统的发育状况,又将传统的双重介质模型进一步细化出纯裂缝结构模型。

纯裂缝结构模型由垂直方格裂缝网络组成,裂缝既是储集空间又是渗流通道,该模型忽略了基岩的渗透能力。Warren and Root(1963)提出了经典的双孔单渗模型和双孔双渗模型,提出基质是主要的流体储集空间,裂缝是流体渗流的主要通道,基质岩块和裂缝系统的拟稳态窜流可以用如下公式表示:

$$\varphi_m c_m \frac{\partial p_m}{\partial t} = \frac{\alpha_{m-f} k_m}{\mu} (p_f - p_m), \quad (4)$$

式中, φ_m 为基质系统孔隙度, %; c_m 为基质系统综合压缩系数, Pa^{-1} ; p_m 为基质系统压力, Pa; k_m 为基质系统的渗透率, m^2 ; p_f 为裂缝系统的压力, Pa; α_{m-f} 为基质与裂缝间窜流形状因子, $1/\text{m}^2$; t 为生产时间, s。

Kazemi 模型将裂缝网络简化为层状, Swaan 模型与 Warren-Root 模型相似,但基质单元的形状由块状变为球体(图1)。针对页岩裂缝网络的尺度、联结方式、导流能力差异, Kuchuk *et al.* (2016) 进一步将 Warren-Root 模型发展为双孔+裂缝交换模型。

真实裂缝的空间分布复杂,在渗流过程中存在裂缝开启和闭合现象,同时受数学语言和计算机计算能力的影响,物理模型假设条件的复杂程度必须要进行适当限制。因此建立一种新型的流体交换机

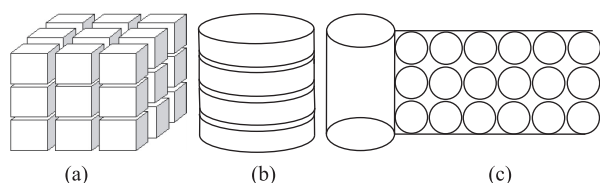


图 1 Warren-Root 均匀裂缝网格模型(a)、Kazemi 层状模型(b)、Swaan 球状模型(c)对比

Fig.1 Comparison of Warren-Root model (a), Kazemi model (b) and Swaan model (c)

制,既能准确描述裂缝分布的空间差异性又能降低数学模型求解的难度是下一步的研究趋势。

2.3 多相流体交换机制

国外学者对裂缝两相流动规律开展物理模拟实验,测定了毛管压力与饱和度、相对渗透率与饱和度(或毛管压力)的函数关系.通过对天然岩石的物理模型开展驱替实验,前人对裂缝内毛管力、相对渗透率与饱和度的关系,以及黏性指进现象、驱油机理和流体交换规律等进行了深入研究(Berger and Braester, 2000; Tang and Firoozabadi, 2001; Li and Lee, 2008; 荣冠等, 2010).近年来,郭平等(2013)研究了裂缝-孔隙型储层油水相渗实验方法.李宁(2015)在不同缝网模式的实验模型基础上,推导出裂缝性油藏的相渗计算模型.潘毅等(2016)提出复杂裂缝网络系统油水相渗实验分析方法.此外笔者在考虑毛细管力的两相渗流数学模型基础上,利用有限元理论研究了不同尺度裂缝的水封气微观机理(图 2 和图 3).

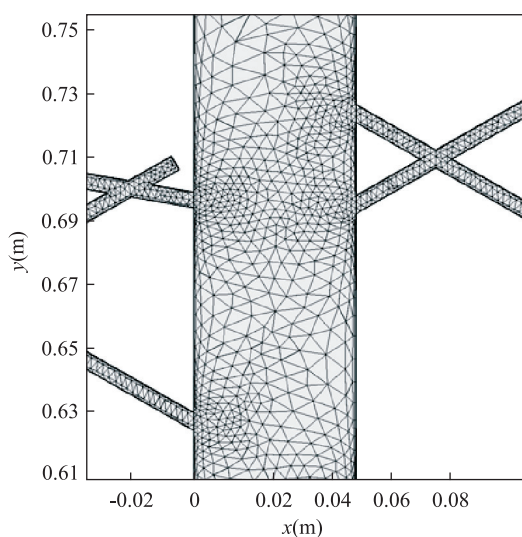


图 2 不同尺度微裂缝网格局部优化

Fig.2 Local optimization sketch of microfracture grid at different scales

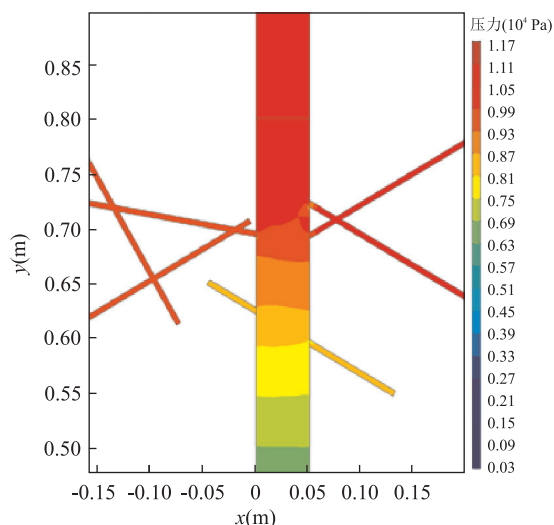


图 3 水封气机理模拟压力分布

Fig.3 Pressure distribution of water blocked gas mechanism simulation

裂缝与基质在渗流规律上差异大,流体在裂缝与基质中的流态差异大,真实裂缝的尺寸差异大,因此不同尺度裂缝多相流体交换机制是下一步的研究重点。

3 裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流数学模型研究进展

与流体交换机制相似,渗流数学模型的建立同样也经历了连续介质裂缝渗流数学模型和离散裂缝渗流数学模型的建立两大阶段。

3.1 连续介质型裂缝渗流数学模型

裂缝性油藏连续介质型裂缝渗流数学模型主要分为均匀裂缝型、孔隙-裂缝型、孔隙-溶洞型、孔隙-溶洞-裂缝型、孔隙-裂缝-溶洞型、多重介质渗流型这 6 大类(Bourdet and Grinarten, 1980; 刘慈群和郭尚平, 1982; Abdassah and Ershaghi, 1986)。

(1)均匀裂缝型渗流数学模型(单孔模型).该数学模型与均质油藏渗流数学模型一致,将裂缝看作唯一的一种流体储集和渗流空间,忽略基质的作用,适用于裂缝特别发育的碳酸盐岩油气藏(图 4),其渗流方程为:

$$\frac{k_f}{\mu} \nabla^2 p_f = \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t}, \quad (5)$$

其中, k_f 为裂缝系统渗透率, m^2 ; p_f 为裂缝系统压力, Pa; β_f 为裂缝系统储集系数, Pa^{-1} 。

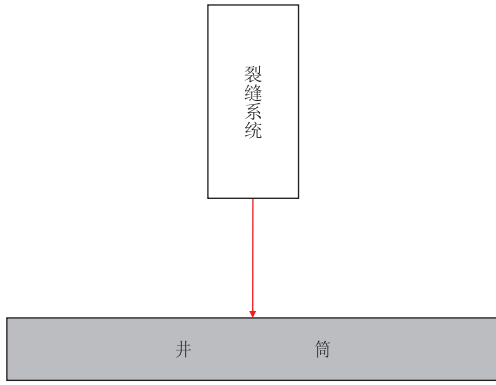


图 4 均匀裂缝型渗流物理模型示意

Fig.4 Physical model of single fracture reservoir

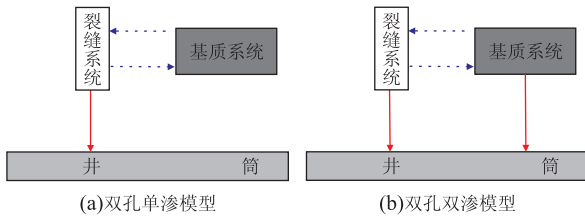


图 5 孔隙-裂缝型储层物理模型示意

Fig.5 Physical model of porosity-fractured reservoir

(2) 孔隙-裂缝型渗流数学模型(双孔单渗模型和双孔双渗模型). 对于该类模型, 根据基质系统是否向井筒发生渗流将模型划分为双孔单渗模型和双孔双渗模型. 对于双孔单渗模型, 流体从基质系统向裂缝系统窜流, 而后再由裂缝系统向井筒进行流动(图 5a); 对于双孔双渗模型, 除了基质系统和裂缝系统之间流体交换之外, 基质和裂缝系统各自都会向井筒发生渗流(图 5b). 流体在各介质中的渗流数学模型表达式为:

$$\begin{cases} \frac{k_f}{\mu} \nabla^2 p_f + \frac{\alpha_{m-f} k_m}{\mu} (p_m - p_f) = \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t}; \\ \frac{k_m}{\mu} \nabla^2 p_m - \frac{\alpha_{m-f} k_m}{\mu} (p_m - p_f) = \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t}; \end{cases} \quad (6)$$

其中, β_m 为基质系统储集系数, Pa^{-1} .

(3) 孔隙-溶洞型渗流数学模型. 该模型假设系统裂缝不发育, 井主要打在溶洞带上, 基质系统中存在流体向溶洞窜流, 溶洞中流体主要依靠弹性膨胀驱替, 如果忽略基质中流体的流动过程(图 6), 该物理模型对应的储层渗流数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{k_c}{\mu} \nabla^2 p_c + \frac{k_m \alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_c) = \beta_c \frac{\partial p_c}{\partial t}; \\ -\frac{k_m \alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_c) = \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t}; \end{cases} \quad (7)$$

其中, k_c 为溶洞系统的渗透率, m^2 ; p_c 为溶洞系统

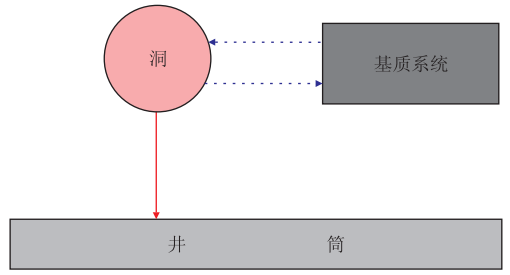


图 6 孔隙-溶洞型储层物理模型示意

Fig.6 Physical model of porosity-vug reservoir

的压力, Pa ; α_{m-c} 为基质与溶洞间窜流形状因子, $1/\text{m}^2$; β_c 为溶洞系数储集系数, Pa^{-1} .

(4) 孔隙-溶洞-裂缝型渗流数学模型. 对于储层孔隙、溶洞和裂缝这 3 种系统同时存在的情形, 根据系统间流体交换规律和介质是否向井筒进行流体供给, 可以将此类三重介质模型划分为三孔单渗模型和三孔双渗模型. 其中, 三孔单渗模型根据井筒钻遇介质的不同, 又可以分为两种模型, 一种为裂缝供给的三孔单渗模型, 另一种为溶洞供给的三孔单渗模型.

当裂缝系统作为唯一的渗流通道向井筒进行流体供给, 而溶洞和基质系统向裂缝系统进行流量补充时(图 7a), 其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{k_f}{\mu} \nabla^2 p_f + \frac{\alpha_{m-f}}{\mu} (p_m - p_f) + \frac{\alpha_{c-f}}{\mu} (p_c - p_f) = \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t}; \\ \frac{k_m}{\mu} \nabla^2 p_m - \frac{\alpha_{m-f}}{\mu} (p_m - p_f) = \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t}; \\ \frac{k_c}{\mu} \nabla^2 p_c - \frac{\alpha_{c-f}}{\mu} (p_c - p_f) = \beta_c \frac{\partial p_c}{\partial t}; \end{cases} \quad (8)$$

其中, α_{c-f} 为溶洞与裂缝间窜流形状因子, $1/\text{m}^2$.

当溶洞系统作为唯一的渗流通道向井筒进行流体供给, 而裂缝和基质系统分别向溶洞系统进行流体补充时(图 7b), 其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{k_c}{\mu} \nabla^2 p_c + \frac{\alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_c) + \frac{\alpha_{f-c}}{\mu} (p_f - p_c) = \beta_c \frac{\partial p_c}{\partial t}; \\ \frac{k_m}{\mu} \nabla^2 p_m - \frac{\alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_c) = \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t}; \\ \frac{k_f}{\mu} \nabla^2 p_f - \frac{\alpha_{f-c}}{\mu} (p_f - p_c) = \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t}; \end{cases} \quad (9)$$

其中, α_{m-c} 为基质与溶洞间窜流形状因子, $1/\text{m}^2$; α_{f-c} 为裂缝与溶洞间窜流形状因子, $1/\text{m}^2$.

当溶洞系统作为唯一的渗流通道向井筒进行流体供给, 而基质系统向裂缝系统渗流之后再向溶洞系统进行流体补充时(图 7c), 其数学模型为:

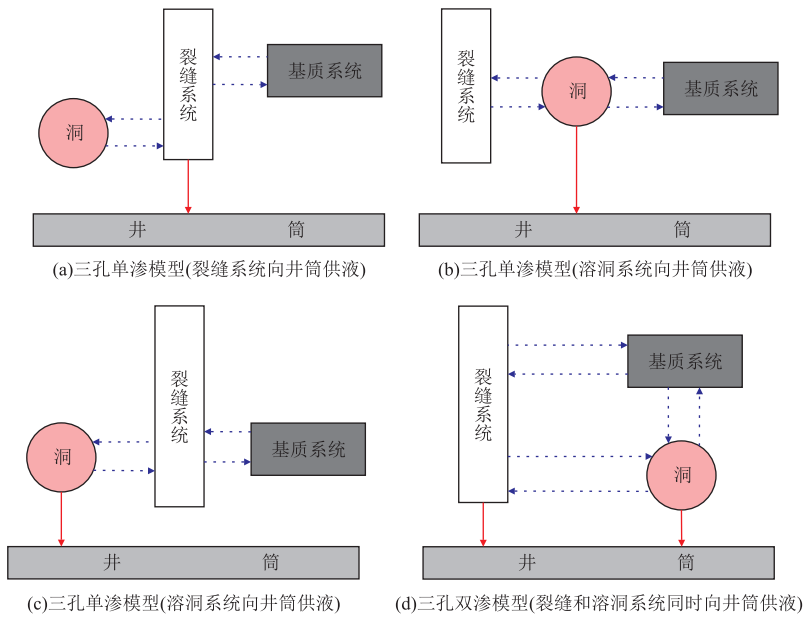


图 7 孔隙-溶洞-裂缝型储层物理模型示意

Fig.7 Physical model of porosity-vug-fractures reservoirs

$$\begin{cases} \frac{k_c}{\mu} \nabla^2 p_c + \frac{\alpha_{f-c}}{\mu} (p_f - p_c) = \beta_c \frac{\partial p_c}{\partial t}; \\ \frac{k_f}{\mu} \nabla^2 p_f - \frac{\alpha_{f-c}}{\mu} (p_f - p_c) + \frac{\alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_f) = \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t}; \\ \frac{k_m}{\mu} \nabla^2 p_m - \frac{\alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_f) = \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t}. \end{cases} \quad (10)$$

当裂缝和溶洞系统同时作为渗流通道向井筒进行流体供给,而基质系统向裂缝系统和溶洞系统进行流量补充时(图 7d),其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{k_f}{\mu} \nabla^2 p_f + \frac{\alpha_{m-f}}{\mu} (p_m - p_f) + \frac{\alpha_{c-f}}{\mu} (p_c - p_f) = \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t}; \\ \frac{k_m}{\mu} \nabla^2 p_m - \frac{\alpha_{m-f}}{\mu} (p_m - p_f) - \frac{\alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_c) = \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t}; \\ \frac{k_c}{\mu} \nabla^2 p_c - \frac{\alpha_{c-f}}{\mu} (p_c - p_f) + \frac{\alpha_{m-c}}{\mu} (p_m - p_c) = \beta_c \frac{\partial p_c}{\partial t}. \end{cases} \quad (11)$$

(5) 多重介质渗流模型.部分复杂碳酸盐岩油气藏中,裂缝、溶洞、基质非均质性强,可能存在多重类型渗流介质,因此可以用 n 重介质渗流数学模型加以描述:

$$\begin{cases} \frac{k_1}{\mu} \nabla^2 p_1 + \frac{\alpha_1}{\mu} (p_2 - p_1) = \beta_1 \frac{\partial p_1}{\partial t}; \\ \frac{k_2}{\mu} \nabla^2 p_2 + \frac{\alpha_1}{\mu} (p_1 - p_2) + \frac{\alpha_2}{\mu} (p_3 - p_2) = \beta_2 \frac{\partial p_2}{\partial t}; \\ \frac{k_3}{\mu} \nabla^2 p_3 + \frac{\alpha_2}{\mu} (p_2 - p_3) + \frac{\alpha_3}{\mu} (p_4 - p_3) = \beta_3 \frac{\partial p_3}{\partial t}; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{k_{n-1}}{\mu} \nabla^2 p_{n-1} + \frac{\alpha_{n-2}}{\mu} (p_{n-2} - p_{n-1}) + \frac{\alpha_{n-1}}{\mu} (p_n - p_{n-1}) = \\ \beta_{n-1} \frac{\partial p_{n-1}}{\partial t}; \\ \frac{k_n}{\mu} \nabla^2 p_n + \frac{\alpha_{n-1}}{\mu} (p_{n-1} - p_n) = \beta_n \frac{\partial p_n}{\partial t}; \end{cases} \quad (12)$$

其中, α_i 为第 i 重介质与第 $i+1$ 重介质之间的窜流形状因子, $1/m^2$; β_i 为第 i 重介质的储集系数, Pa^{-1} ; p_i 为第 i 重介质系统的压力, Pa ; k_i 为第 i 重介质的渗透率, m^2 .

经过近半世纪的理论研究,连续介质型裂缝渗流数学模型已基本完备, n 重介质渗流数学模型基本可以概括不同类型裂缝性油气藏的渗流特点,因此将来的研究工作应主要集中在 n 重介质渗流数学模型的快速求解上.

(6) 多相流体渗流数学模型.由于油气成藏过程是烃类流体在各种驱动力作用下从烃源层运移到目标储层中;在油气聚集过程中,烃类流体将储层孔隙空间中原始水排出形成油气藏.因此,所有油气藏或多或少含有一定量地层水,只不过有些储层含水饱和度较低,低于储层的可动水饱和度.对于该类油气藏可以认为其是单相渗流.而对于那些地层水含量较高的油气藏,渗流过程至少是两相流体参与,几乎大部分油气藏渗流都是一个多相流问题.下面笔者给出油气水三相渗流一般数学模型,如式(13)和式(14)所示:

$$\nabla \cdot \left[\alpha_c \frac{kk_{rl}}{\mu_l B_l} (\nabla p_l - \gamma_l \nabla Z) \right] + \frac{q_{lsc}}{V_b} = \beta_c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_l}{B_l} \right), \quad (l=o, w), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \left[\alpha_c \frac{kk_{rg}}{\mu_g B_g} (\nabla p_g - \gamma_g \nabla Z) \right] + \\ & \nabla \cdot \left[\alpha_c R_s \frac{kk_{ro}}{\mu_o B_o} (\nabla p_o - \gamma_o \nabla Z) \right] + \\ & \frac{q_{gsc}}{V_b} = \beta_c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_g}{B_g} + \frac{\varphi R_s S_o}{B_g} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

其中, β_c 为传导系数转换因子, 常数; α_c 为体积转换因子, 常数; k 为储层的绝对渗透率, m^2 ; μ_i 为 i 相的黏度 ($i = o, g, w$), $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p_i 为第 i 相的压力, Pa ; k_{ri} 为第 i 相的相对渗透率, m^2 ; S_i 为第 i 相的饱和度, %; B_i 为第 i 相的体积系数, m^3/m^3 ; γ_i 为第 i 相流体的重度, m/s^2 ; q_{sci} 为第 i 相流体的产量, m^3/s ; R_s 为溶解气油比, m^3/m^3 ; V_b 为控制单元体积, m^3 ; Z 为海拔高度, m 。

最早的三维三相的裂缝性油藏数值模拟器是 Thomas *et al.* (1980) 开发的, 该模拟器采用 Warren-Root 双重介质模型表征天然裂缝与基质分布关系, 同时考虑了毛管压力、重力和黏滞力的影响。随后, 熊伟等 (2002) 利用岩石力学弹性定律考虑岩石骨架变形, 提出了变形介质多相流动流固耦合数学模型。刘晓丽等 (2005) 基于岩体渗流水力学和多相渗流力学理论, 采用 Galerkin 有限元方法求解了双重变形介质气水两相流固耦合数学模型。张华强 (2011) 分析了考虑非线性渗流对裂缝性油藏多相渗流的影响。付莹等 (2015) 将流管法引入到裂缝性油藏多相渗流中。尹光志等 (2016) 建立了多场多相耦合下裂缝渗流试验系统。

3.2 离散裂缝渗流数学模型

天然裂缝空间分布和连通性特征参数 (如裂缝的方位、开度、长度) 十分复杂, 连续介质型在刻画复杂裂缝网络系统时存在简化过大的问题, 必须借助于离散数学方法加以描述。前人以天然裂缝岩心分析、成像测井、三维地震反演等资料为基础, 应用概率统计、随机模拟等方法, 建立了裂缝性储层离散裂缝随机网络模型, 利用有限元、体积元、离散元等数学手段对渗流方程进行求解, 研究了离散裂缝网络的渗流规律。目前离散裂缝模型分为非结构化离散裂缝模型和嵌入式离散裂缝模型两大类。

3.2.1 随机离散裂缝模型 非结构化离散裂缝模型主要采用非结构化网格及降维处理技术, 在保证准确性的情况下降低裂缝的维数。当地层中存在几条明确的大裂缝时, 非结构化离散裂缝模型比常规双孔模型更复合实际渗流特点 (图 8)。20 世纪 80 年代, 离散裂缝网络模型被首次引入到渗流力学领域中, 成功解决了核污染物在随机裂缝网络中的扩散问题 (吕坐彬等, 2010)。随后许多学者采用这一思想, 借助计算机技术对离散裂缝网络模型的建立和生成算法进行了研究 (Noorishad and Mehran, 1982; Dershowitz, 1985; Ivanova, 1995)。

在随机裂缝渗流模拟研究方面, 利用随机裂缝

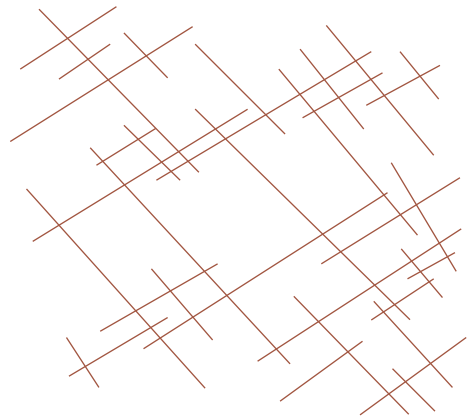


图 8 二维随机离散裂缝示意

Fig.8 Random discrete fracture

生成算法结合油藏数值模拟思想, 许多学者对各种复杂模型的流动问题进行了研究。Juanes *et al.* (2002) 解决了二维和三维离散裂缝油藏单相数值模拟问题。Karimi-Fard *et al.* (2004) 求解了离散裂缝油藏三维多相流数值模拟算法。Matthäi *et al.* (2005) 采用混合网格有限元法解决了三维离散裂缝油藏两相流数值模拟问题。姚军等 (2010) 利用有限元方法和离散裂缝网络模型, 探讨了天然裂缝性油藏的离散裂缝网络数值模拟方法。黄朝琴等 (2011) 利用裂缝渗流等效方法建立了离散裂缝模型, 推导了裂缝油藏有限元数值模拟模型。宋宏志 (2012) 针对二维两相油藏数值模拟中的 PEBI 网格快速生成展开了深入研究。张芮菡 (2015) 结合有限元-有限体积方法求解了离散裂缝网络的油藏数值模拟问题。袁迎中等 (2016) 利用 PEBI 方法, 结合离散裂缝传导率计算法则, 实现了高精度的离散裂缝油藏数值模拟。

3.2.2 嵌入式离散裂缝模型 离散裂缝模型虽然计算结果精确, 但受计算量大、裂缝和溶洞系统预测难度大的限制, 难以大面积推广, 因此将传统双孔模型和离散模型相结合, 把裂缝嵌入到传统网格内, 裂缝内的流动类似于井方程, 裂缝与基岩通过源汇项处理, 形成了嵌入式离散裂缝模型 (图 9)。

Lee *et al.* (1999, 2001) 和 Li and Lee (2008) 提出了嵌入式离散裂缝模型。该模型对小尺度、中尺度和大尺度裂缝分别处理, 网格划分成正交的结构网格。嵌入式离散裂缝模型优势在于可以直接通过改进的黑油模拟器进行模拟, 在网格的前处理阶段, 通过定义裂缝-裂缝网格、裂缝-基质网格、基质-基质网格的链接信息并对传导率进行计算修正, 即可通过调用模拟程序进行模拟。随后, Moifar *et al.*

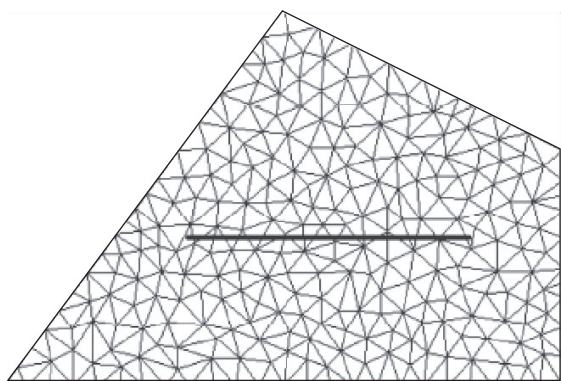


图 9 嵌入式离散裂缝示意

Fig.9 Embedded discrete fracture model

据严侠等(2014)

(2013, 2014)将嵌入式方法扩展到三维并在致密油气中得到应用。Zuloaga-Molero *et al.* (2016)扩展了嵌入式离散裂缝模型,建立了致密油的 CO_2 开发组分数值模拟器。嵌入式离散裂缝模型在其他油藏形式中也得到广泛应用(Panfili *et al.*, 2013, 2014; Filho *et al.*, 2015),近来,Fumagalli *et al.* (2016)利用嵌入式离散裂缝模型建立了裂缝油藏的升级方法,大大提高了天然裂缝油藏数值模拟的计算效率。

非结构化离散裂缝渗流模型和嵌入式离散裂缝渗流模型的发展还处于起步阶段,非结构化离散裂缝渗流模型的难点在于天然离散裂缝的识别和建模上,嵌入式离散裂缝渗流模型的难点在于主裂缝和次裂缝的取舍与近似处理上,将来嵌入式离散裂缝渗流数学模型的理论完善和现场应用是裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流理论发展的主方向。

4 研究展望

我国部分裂缝性碳酸盐岩气藏(如威远气田)单井关井后复产产量急剧下降,甚至无法产出天然气,形成了大量的水封气。因此,关井期间如何考虑流体的再分布?如何描述关井期间裂缝-基质间流体的渗吸规律?如何表征裂缝壁面阀压效应?这些问题有待今后进一步探讨和研究。

此外,不同级别的裂缝渗流规律差异大,主裂缝通道的渗流规律有别于常规裂缝渗流。如四川盆地部分石炭系气井离气水界面平面距离为 2 km,垂向距离为 300 m;开井一年之内大量产出地层水,日产气量从 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 快速下降到 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,日产水从 $0 \text{ m}^3/\text{d}$ 上升到 $400 \text{ m}^3/\text{d}$,常规渗流力学方法很难模拟上述问题。因此,如何考虑天然裂缝非均

质性对气-水两相渗流的影响?如何描述气体在基质-裂缝-溶洞等多种介质之间的流体交换机制?如何表征油、气、水、工作液等流体介质在裂缝中的运动和分布规律?将是未来亟待解决的问题。

天然裂缝性油藏往往具有较强的应力敏感性,随着裂缝中流体压力的下降,不同尺度的裂缝闭合规律差异较大,裂缝快速闭合导致裂缝渗透率显著下降,油井产量递减速度加快。因此,如何利用数学手段描述不同尺度裂缝的闭合规律,建立描述不同尺度裂缝闭合规律的流固耦合渗流数学模型是迫切需要解决的问题。此外,随着储层改造和提高采收率技术的普及,裂缝性油藏注入流体与储层岩石和储层流体会发生化学反应,如何模拟化学反应产物在裂缝中的形成、运移、堵塞过程,如何建立考虑化学反应与流-固多相渗流的耦合数学模型,这些问题也是渗流力学界的热点研究课题。

综上所述,裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流理论研究工作还任重道远,将来裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理研究工作应主要考虑以下几个方面:

(1)实验仿真与软件模拟相结合。裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流实验尺度跨度大,有基于孔隙级的微观渗流可视化系统、有基于岩心级的岩心驱替系统、有基于真实岩块的大物模仿真实验系统。物理实验可重复性差,受偶然因素影响较大,因此在实验过程中必须与渗流软件模拟相结合。目前用于渗流仿真的除 Eclipse、CMG 等商业软件外,还有各石油公司和院校的自编模拟器、Comsol、Fluent 等其他行业软件。如何开发一款实验与模拟紧密结合的商业模拟软件,是目前的一大研究热点。

(2)流体力学与固体力学相结合。裂缝性碳酸盐岩油气藏存在十分复杂的油、气、水等流体介质,上述流体介质在基质、裂缝、溶洞中的赋存状态十分复杂;流体在裂缝中的流动状态差异大,有层流、紊流、管流等;且在流动过程中,压力场的变化会诱导局部应力场发生变化,导致不同尺度的裂缝开启、闭合规律不尽相同。因此,要力争在不同尺度裂缝流固耦合领域取得技术突破。

(3)非均质刻画与视均质处理相结合。不同尺度的裂缝成因较复杂,大尺度裂缝往往受多期地质构造运动控制,中小尺度裂缝受构造曲率、岩性、物性等多种因素控制;如要刻画不同尺度裂缝,分析其对渗流规律的影响,就必须将非均质刻画与视均质处理有机结合起来。对于大尺度裂缝,应结合现有的非均匀化结构网络描述其展布的非均匀性;对于中小

尺度裂缝, 应结合等效连续性处理技术, 尽量降低裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流理论的研究难度。

(4) 微观与宏观相结合。微观上应结合现有的先进计算方法、实验方法, 建立考虑复杂裂缝形态和复杂流动规律的实验室模拟物理模型和微观渗流仿真数值模拟模型, 研究油、气、水、固体等多种介质在复杂裂缝中的运动规律和流体交换规律。宏观上应结合现有的裂缝描述和预测手段, 充分考虑裂缝的非均质性和复杂性, 力争在以下几点实现重点突破: ① 裂缝非均匀网格刻画与快速生成算法研究; ② 建立多重网格与多场、多相渗流数学模型; ③ 有限元、边界元、离散元等新型求解算法在裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流理论中的应用; ④ 开发千万级大型稀疏矩阵的快速求解算法(并行计算和云计算)等先进计算方法。

5 结论

(1) 裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理在天然裂缝渗流能力表征、溶洞—裂缝—基质介质间流体交换机制、多场多相渗流数学模型等领域取得了丰硕的研究成果, 指导了裂缝性碳酸盐岩油气藏的快速、高效开发。

(2) 复杂沟槽系统多相多场耦合渗流能力微观模拟、不同尺度裂缝下多相流体交换机制、嵌入式离散裂缝渗流数学模型的完善与现场应用、嵌入式离散裂缝模型千万级网格大型稀疏矩阵快速求解算法(并行计算理论、云计算理论)等问题迫切需要进一步完善。在将来攻关过程中应注意实验仿真与软件模拟相结合、流体力学与固体力学相结合、非均质刻画与视均质处理相结合、微观与宏观相结合, 实现裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理的重大理论突破。

References

Abdassah, D., Ershaghi, I., 1986. Triple-Porosity Systems for Representing Naturally Fractured Reservoirs. *SPE Formation Evaluation*, 1(2): 113—127. doi: 10.2118/13409—pa

Barenblatt, G.I., Zheltov, I.P., Kochina, I.N., 1960. Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 24(5): 1286—1303. doi: 10.1016/0021—8928(60)90107—6

Berger, D., Braester, C., 2000. Gas-Water Displacement through Fracture Networks. *Water Resources Research*, 36(11): 3205—3210. doi: 10.1029/2000wr900056

Bourdet, D., Gringarten, A.C., 1980. Determination of Fissure Volume and Block Size in Fractured Reservoirs by Type-Curve Analysis. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas. doi: 10.2118/9293—ms

Cai, J.C., Guo, S.L., You, L.J., et al., 2013. Fractal Analysis of Spontaneous Imbibition Mechanism in Fractured-Porous Dual Media Reservoir. *Acta Physica Sinica*, 62(1): 220—224 (in Chinese with English abstract).

Chang, Z.X., Zhao, Y.S., Hu, Y.Q., et al., 2004. Theoretic and Experimental Studies of the Coupling of Seepage Flow and 3d Stresses in Fractured Rock Masses. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(Suppl.2): 4907—4911 (in Chinese with English abstract).

Che, X.X., 2016. Investigation of Shear Slip Fracture Conductivity Model (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

de Swaan, O.A., 1976. Analytic Solutions for Determining Naturally Fractured Reservoir Properties by Well Testing. *SPE Journal*, 16(3): 117—122. doi: 10.2118/5346—pa

Dershowitz, W.S., 1985. Rock Joint Systems (Dissertation). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Ding, Z.P., Liu, Y.T., Qu, Y.G., 2013. 3D Macro Physical Experiment of Matrix-Fracture Coupling Flow in Fractured Reservoirs. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 20(6): 109—111 (in Chinese).

Elsworth, D.E., Goodman, R.E., 1986. Characterization of Rock Fissure Hydraulic Conductivity Using Idealized Wall Roughness Profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 23(3): 233—243. doi: 10.1016/0148—9062(86)90969—1

Filho, J.S.D.A.C., Shakiba, M., Moïfar, A., et al., 2015. Implementation of a Preprocessor for Embedded Discrete Fracture Modeling in an IMPEC Compositional Reservoir Simulator. SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston. doi: 10.2118/173289—ms

Firoozabadi, A., Markeset, T., 1992. An Experimental Study of Capillary and Gravity Crossflow Fractured Porous Media. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, 617—626. doi: 10.2118/24918—MS

Fourar, M., Bories, S., Lenormand, R., et al., 1993. Two-Phase Flow in Smooth and Rough Fractures: Measurement and Correlation by Porous-Medium and Pipe Flow Models. *Water Resources Research*, 29(11): 3699—3708. doi: 10.1029/93wr01529

Fu, Y., Yin, H.J., Wang, M.N., 2015. Numerical Simulation of Naturally Fractured Low-Permeability Reservoirs Based on Stream-Tube Model. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 32(4): 308—311 (in Chinese)

- with English abstract).
- Fumagalli, A., Pasquale, L., Zonca, S., et al., 2016. An Upscaling Procedure for Fractured Reservoirs with Embedded Grids. *Water Resources Research*, 52(8): 6506—6525. doi:10.1002/2015WRD017729
- Guo, P., Zhang, T., Zhu, Z. Q., et al., 2013. Study on Oil-Water Relative Permeability Experiments of Fractured-Porous Reservoirs. *Reservoir Evaluation and Development*, 3(3): 19—22 (in Chinese with English abstract).
- Han, G. Q., Song, W. D., Song, Y., et al., 2014. Visualized Water/Oil Displacement Physical Model and Physical Simulation Experiment Model of Fractured Reservoir. *Patent*, CN201410452850.5. 2014—12—10 (in Chinese).
- Han, J. F., Sun, C. H., Wang, Z. Y., et al., 2017. Superimposed Compound Karst Model and Oil and Gas Exploration of Carbonate in Tazhong Uplift. *Earth Science*, 42(3): 410—420 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. Q., Yao, J., Wang, Y. Y., et al., 2011. Numerical Simulation on Water Flooding Development of Fractured Reservoirs in a Discrete-Fracture Model. *Chinese Journal of Computational Physics*, 28(1): 41—49 (in Chinese with English abstract).
- Ivanova, V. M., 1995. Three-Dimensional Stochastic Modeling of Rock Fracture System (Dissertation). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Jeong, W. C., Song, J., 2005. Numerical Investigations for Flow and Transport in a Rough Fracture with a Hydro-mechanical Effect. *Energy Sources*, 27(11): 997—1011. doi:10.1080/00908310490450827
- Jiang, H. J., Yan, J. N., 2000. Experimental Study on Stress Sensitivity of Fractured Reservoir. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 7(3): 39—41 (in Chinese with English abstract).
- Juanes, R., Samper, J., Molinero, J., 2002. A General and Efficient Formulation of Fractures and Boundary Conditions in the Finite Element Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54(12): 1751—1774. doi:10.1002/nme.491
- Karimi-Fard, M., Durlofsky, L. J., Aziz, K., 2004. An Efficient Discrete-Fracture Model Applicable for General-Purpose Reservoir Simulators. *SPE Journal*, 9(2): 227—236. doi:10.2118/88812—pa
- Kazemi, H., Merrill Jr, L. S., Porterfield, K. L., et al., 1976. Numerical Simulation of Water-Oil Flow in Naturally Fractured Reservoir. *SPE Journal*, 16(6): 317—326. doi:10.2118/5719—PA
- Kuchuk, F., Morton, K., Biryukov, D., 2016. Rate-Transient Analysis for Multistage Fractured Horizontal Wells in Conventional and Un-Conventional Homogeneous and Naturally Fractured Reservoirs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dubai*. doi:10.2118/181488—ms
- Lee, S. H., Jensen, C. L., Lough, M. F., 1999. An Efficient Finite Difference Model for Flow in a Reservoir with Multiple Length-Scale Fractures. *SPE Journal*, 5(3): 268—275. doi:10.2118/56752—ms
- Lee, S. H., Lough, M. F., Jensen, C. L., 2001. Hierarchical Modeling of Flow in Naturally Fractured Formations with Multiple Length Scales. *Water Resources Research*, 37(3): 443—455. doi:10.1029/2000WR900340
- Li, J., Peng, C. Z., Wang, L., et al., 2008. Simulation Experiment of Water-Displacing-Oil Mechanism in Fractured-Cavity Carbonate Oil Reservoirs. *Natural Gas Exploration & Development*, 31(4): 41—44 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. Y., Lee, S. H., 2008. Efficient Field-Scale Simulation of Black Oil in a Naturally Fractured Reservoir through Discrete Fracture Networks and Homogenized Media. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 11(4): 750—758. doi:10.2118/103901—PA
- Li, N., 2015. Experiment Study on Oil/Water Relative Permeability Curve of Fractured Reservoir (Dissertation). Southwest Petroleum University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Li, W. X., Wang, G., Du, W. Z., et al., 2016. Development and Application of a True Triaxial Gas-Solid Coupling Testing System for Coal Seepage. *Rock and Soil Mechanics*, 37(7): 2109—2118 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., 2013. Research on the Influence of the Distribution Law of Fracture Interval upon Conductivity (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Liang, M., 2010. Numerical Simulation Study of Flow in Single Rough Fractures Based on Fluent (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Q., Guo, S. P., 1982. Research on Seepage in Multiple Media. *Advances in Mechanics*, 12(4): 360—364 (in Chinese).
- Liu, X. L., Liang, B., Wang, S. J., et al., 2005. Fluid-Solid Coupled Mathematical Model for Water-Air Two-Phase Infiltration and Deformation of Dual Porous Media. *Journal of Hydraulic Engineering*, 36(4): 405—412 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. D., Miao, F. Q., Luo, X. F., et al., 2012. Experiment of Stress Sensitivity for Igneous Fractured Reservoir. *Natural Gas Geoscience*, 23(2): 208—212 (in Chinese with English abstract).

- Lomize, G. M., 1951. Flow in Fractured Rocks. Gesenergoizdat, Moscow.
- Louis, C., 1969. A Study of Groundwater Flow in Jointed Rock and Its Influence on the Stability of Rock Masses (Dissertation), Imperial College London, London.
- Lü, Z. B., Zhao, C. M., Huo, C. L., et al., 2010. Geological Modeling of Fractured Buried Hill Mutation Reservoir; With JZ25-JS Buried Hill as an Example. *Science & Technology Review*, 28(13): 68—72 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Z. G., Yao, J., Wang, D. S., et al., 2010. Experimental Study on Single-Phase Flow in Orthogonal Fracture Network. *Petroleum Drilling Techniques*, 38(3): 92—94 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L. P., Li, Y., 2007. Calculation Method of Material Equilibrium Equation for Fracture-Cave Type Reservoirs. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 29(5): 66—68 (in Chinese with English abstract).
- Matthäi, S. K., Mezentsev, A., Belayneh, M., 2005. Control-Volume Finite-Element Two-Phase Flow Experiments with Fractured Rock Represented by Unstructured 3D Hybrid Meshes. SPE Reservoir Simulation Symposium, Woodlands, doi:10.2118/93341—ms
- Moinfar, A., Varavei, A., Sepehrnoori, K., et al., 2013. Development of a Coupled Dual Continuum and Discrete Fracture Model for the Simulation of Unconventional Reservoirs. SPE Reservoir Simulation Symposium, Woodlands, doi:10.2118/163647—ms
- Moinfar, A., Varavei, A., Sepehrnoori, K., et al., 2014. Development of an Efficient Embedded Discrete Fracture Model for 3D Compositional Reservoir Simulation in Fractured Reservoirs. *SPE Journal*, 19(2): 289—303. doi:10.2118/154246—PA
- Neuzil, C. E., Tracy, J. V., 1981. Flow through Fractures. *Water Resources Research*, 17(1): 191—199. doi:10.1029/wr017i001p00191
- Nieto, C. M., Pournik, M., Hill, A. D., 2008. The Texture of Acidized Fracture Surfaces; Implications for Acid Fracture Conductivity. *SPE Production & Operations*, 23(3): 343—352. doi:10.2118/102167—pa
- Noorishad, J., Mehran, M., 1982. An Upstream Finite Element Method for Solution of Transient Transport Equation in Fractured Porous Media. *Water Resources Research*, 18(3): 588—596. doi:10.1029/wr018i003p00588
- Pan, Y., Wang, P. R., Song, W. D., et al., 2016. Experimental Researches on Relative Permeability Curve of Complex Fracture System. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 38(4): 110—116 (in Chinese with English abstract).
- Panfili, P., Cominelli, A., 2014. Simulation of Miscible Gas Injection in a Fractured Carbonate Reservoir Using an Embedded Discrete Fracture Model. International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, doi:10.2118/171830—ms
- Panfili, P., Cominelli, A., Scotti, A., 2013. Using Embedded Discrete Fracture Models (EDFMs) to Simulate Realistic Fluid Flow Problems. Second EAGE Workshop on Naturally Fractured Reservoirs, Muscat, doi:10.3997/2214—4609.20132026
- Park, Y. J., Lee, K. K., Berkowitz, B., 2001. Effects of Junction Transfer Characteristics on Transport in Fracture Networks. *Water Resources Research*, 37(4): 909—923. doi:10.1029/2000WR900365
- Rong, G., Zhou, C. B., Wang, E. Z., et al., 2010. A Model for Unsaturated Seepage Flows in Rock Fracture and Its Calculation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 32(10): 1551—1556 (in Chinese with English abstract).
- Ruffet, C., Fery, J. J., Onaisi, A., 1998. Acid Fracturing Treatment; A Surface Topography Analysis of Acid Etched Fractures to Determine Residual Conductivity. *SPE Journal*, 3(2): 155—162. doi:10.2118/38175—PA
- Snow, D. T., 1969. Anisotropic Permeability of Fractured Media. *Water Resources Research*, 5(6): 1273—1289. doi:10.1029/wr005i006p01273
- Song, H. Z., 2012. Study on PEBI Gridding Technology in Reservoir Numerical Simulation (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Tang, G. Q., Firoozabadi, A., 2001. Effect of Pressure Gradient and Initial Water Saturation on Water Injection in Water-Wet and Mixed-Wet Fractured Porous Media. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 4(6): 516—524. doi:10.2118/74711—PA
- Thomas, K., Thomas, N. D., Pierson, R. G., 1980. Fractured Reservoir Simulation. *SPE Journal*, 23(1): 42—54. doi:10.2118/9305—PA
- Tong, K. J., Liu, H. Q., Zhang, Y. C., et al., 2015. Three-Dimensional Physical Modeling of Waterflooding in Metamorphic Fractured Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 42(4): 538—544 (in Chinese with English abstract).
- Warren, J. E., Root, P. J., 1963. The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. *SPE Journal*, 3(3): 245—255. doi:10.2118/426—PA
- Wu, H. J., Kong, C. E., Yin, X. Y., et al., 2016. Numerical A-

- analysis for Acid-Corroded Wormholes in Fractured Carbonate Rocks, *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 33(4):105—108 (in Chinese with English abstract).
- Xia, M. Q., 2015, Research of Crack Closure Law and Seepage Mechanism (Dissertation). Xi'an Shiyou University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., 1994, Fractal Estimation of Rock Joint Roughness Coefficient (JRC). *Science in China (Series B)*, (5): 524—530 (in Chinese).
- Xiong, W., Tian, G. L., Huang, L. X., et al., 2002, Solid-Fluid Coupling Phenomenon in Deformable Porous Media. *Journal of Hydrodynamics*, 17(6):770—776 (in Chinese with English abstract).
- Yan, X., Huang, Z. Q., Yao, J., et al., 2014, The Embedded Discrete Fracture Model Based on Mimetic Finite Difference Method. *Scientia Sinica Technologica*, 44(12):1333—1342 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D., Hu, Z. Q., Zhao, Y. S., et al., 2004, Experimental Study on the Influence of Tangential Stress on Gas Seepage. Proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics and Engineering, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. S., Yu, B. M., Zou, M. Q., et al., 2014, A Fractal Analysis of Laminar Flow Resistance in Roughened Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77: 208—217. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.016
- Yang, Z., Sun, J. S., Zhang, J., et al., 2009, Experimental Study on the Stress Sensitivity of Fractured Carbonate Reservoirs. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 26(6):5—6 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J., Huang, Z. Q., Wang, Z. S., et al., 2010, Mathematical Model of Fluid Flow in Fractured Vuggy Reservoirs Based on Discrete Fracture-Vug Network. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5):815—824 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J., Wang, X., Wang, C. C., et al., 2013, The Influence of Carbonate Rocks Reservoir Parameters on Microscopic Flow. *Earth Science*, 38(5):1047—1052 (in Chinese with English abstract).
- Yin, G. Z., Li, W. P., Xu, J., et al., 2016, Development and Application of Fracturing and Seepage Experimental System for Multi-Physical Field and Multiphase Coupling of Porous Media. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(Suppl.1):2853—2861 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y. Z., Xiang, Z. P., Qi, Z. L., et al., 2016, Numerical Simulation Research of Discrete Fracture Reservoir Based on PEBI Grid. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 3(31):379—386 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, F. H., Chen, X. Z., Guo, J. C., 2016, Calculation of Unsteady Productivity of Fractured Horizontal Wells. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(4):1353—1358 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Kang, Y. L., Chen, J. S., et al., 2007, Study on Visualization for Stress Sensibility of Fracture Width in Reservoir. *Drilling & Production Technology*, 30(1):41—43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Kang, Y. L., Chen, Y. J., et al., 2004, Influence of the Rock Components and Fractures on Tight Sandstone Stress Sensitivity. *Natural Gas Industry*, 24(7):55—57 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. Q., 2011, Numerical Simulation of Low Permeability Fractured Reservoir Based on Nonlinear Flow Law (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. Y., He, S. L., Luan, G. H., et al., 2014, Quantitative Study of Stress Sensitivity in Ultralow Permeability Fracture Media Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(Suppl.1):3349—3354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Ning, Z. F., Zhang, H. S., et al., 2016, New Insights and Discussions on Stress Sensitivity of Fractured Tight Reservoir. *Natural Gas Geoscience*, 27(5):918—923 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. H., 2015, Study on Fractured Reservoir Numerical Simulation Based on Infinite Element-Infinite Volume Method (Dissertation). Southwest Petroleum University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Jiao, D., Luo, P. Y., et al., 1998, Morphologic Description of Natural Rock Crack Faces. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 20(2):19—22 (in Chinese).
- Zhang, X., Zhang, W., Jin, X. J., et al., 2016, Identification of Pore Types and Study of Poroperm Relationships Based on Logging Data in Puguang Carbonate Reservoir. *Earth Science*, 41(12):2119—2126 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. F., Chen, M., Jin, X., et al., 2015, Scale Model of Stress Sensitivity for Low Permeability Fractured Reservoirs. *Acta Physica Sinica*, 3(1):7—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang, Y., 2014, Study on Acid Etched Fracture Conductivity Based on Digital Characterization (Dissertation). Southwest Petroleum University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zuloaga-Molero, P., Yu, W., Xu, Y. F., et al., 2016, Simulation

Study of CO₂-EOR in Tight Oil Reservoirs with Complex Fracture Geometries. *Scientific Reports*, 6 (1): 33–45. doi:10.1038/srep33445

附中文参考文献

- 蔡建超, 郭士礼, 游利军, 等, 2013. 裂缝—孔隙型双重介质油藏渗吸机理的分形分析. *物理学报*, 62(1): 220–224.
- 常宗旭, 赵阳升, 胡耀青, 等, 2004. 裂隙岩体渗流与三维应力耦合的理论与实验研究. *岩石力学与工程学报*, 23(增刊 2): 4907–4911.
- 车星祥, 2016. 裂缝剪切滑移导流能力模型研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 丁祖鹏, 刘月田, 屈亚光, 2013. 裂缝油藏基质裂缝耦合渗流三维宏观物理实验. *特种油气藏*, 20(6): 109–111.
- 付莹, 尹洪军, 王美楠, 2015. 流管法天然裂缝性低渗透油藏数值模拟研究. *河北工业科技*, 32(4): 308–311.
- 郭平, 张涛, 朱中谦, 等, 2013. 裂缝—孔隙型储层油水相渗实验研究. *油气藏评价与开发*, 3(3): 19–22.
- 韩国庆, 宋道万, 宋勇, 等, 2014. 裂缝性油藏可视化水驱油物理模型和物理模拟实验装置. CN104196503A.
- 韩剑发, 孙崇浩, 王振宇, 等, 2017. 塔中隆起碳酸盐岩叠合复合岩溶模式与油气勘探. *地球科学*, 42(3): 410–420.
- 黄朝琴, 姚军, 王月英, 等, 2011. 基于离散裂缝模型的裂缝性油藏注水开发数值模拟. *计算物理*, 28(1): 41–49.
- 蒋海军, 鄢捷年, 2000. 裂缝性储集层应力敏感性实验研究. *特种油气藏*, 7(3): 39–41.
- 李俊, 彭彩珍, 王雷, 等, 2008. 缝洞型碳酸盐岩油藏水驱油机理模拟实验研究. *天然气勘探与开发*, 31(4): 41–44.
- 李宁, 2015. 裂缝性油藏油水相渗曲线实验研究(硕士学位论文). 成都: 西南石油大学.
- 李文鑫, 王刚, 杜文州, 等, 2016. 真三轴气固耦合煤体渗流试验系统的研制及应用. *岩土力学*, 37(7): 2109–2118.
- 李莹, 2013. 裂缝间距分布规律对导流能力的影响研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 梁敏, 2010. 基于 Fluent 的粗糙单裂隙水流数值模拟研究(硕士学位论文). 合肥: 合肥工业大学.
- 刘慈群, 郭尚平, 1982. 多重介质渗流研究进展. *力学进展*, 12(4): 360–364.
- 刘晓丽, 梁冰, 王思敬, 等, 2005. 水气二相渗流与双重介质变形的流固耦合数学模型. *水利学报*, 36(4): 405–412.
- 刘之的, 苗福全, 罗晓芳, 等, 2012. 火山岩裂缝型储层应力敏感性实验研究. *天然气地球科学*, 23(2): 208–212.
- 卢占国, 姚军, 王殿生, 等, 2010. 正交裂缝网络单相流动试验研究. *石油钻探技术*, 38(3): 92–94.
- 吕彬彬, 赵春明, 霍春亮, 等, 2010. 裂缝性潜山变质岩储层地质建模方法——以锦州 25-JS 潜山为例. *科技导报*, 28(13): 68–72.
- 马立平, 李允, 2007. 缝洞型油藏物质平衡方程计算方法研究.

西南石油大学学报(自然科学版), 29(5): 66–68.

- 潘毅, 王攀荣, 宋道万, 等, 2016. 复杂裂缝网络系统油水相渗曲线特征实验研究. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 38(4): 110–116.
- 荣冠, 周创兵, 王恩志, 等, 2010. 岩石裂隙非饱和水力模型及其模拟计算. *岩土工程学报*, 32(10): 1551–1556.
- 宋宏志, 2012. 油藏数值模拟中 PEBI 网格技术研究(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学.
- 童凯军, 刘慧卿, 张迎春, 等, 2015. 变质岩裂缝性油藏水驱油特征三维物理模拟. *石油勘探与开发*, 42(4): 538–544.
- 吴红军, 孔嫦娥, 伊向艺, 等, 2016. 裂缝性碳酸盐岩酸蚀蚓孔数字化分析. *钻井液与完井液*, 33(4): 105–108.
- 夏汝沁, 2015. 裂缝闭合规律及其渗流特征研究(硕士学位论文). 西安: 西安石油大学.
- 谢和平, 1994. 岩石节理粗糙度系数(JRC)的分形估计. *中国科学(B辑)*, (5): 524–530.
- 熊伟, 田根林, 黄立信, 等, 2002. 变形介质多相流动流固耦合数学模型. *水动力学研究与进展*, 17(6): 770–776.
- 严侠, 黄朝琴, 姚军, 等, 2014. 基于模拟有限差分的嵌入式离散裂缝数学模型. *中国科学: 技术科学*, (12): 1333–1342.
- 杨栋, 胡耀青, 赵阳升, 等, 2004. 切向应力对气体裂缝渗流规律影响的实验研究. 成都: 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集.
- 杨枝, 孙金声, 张洁, 等, 2009. 裂缝性碳酸盐岩储层应力敏感性实验研究. *钻井液与完井液*, 26(6): 5–6.
- 姚军, 黄朝琴, 王子胜, 等, 2010. 缝洞型油藏的离散缝洞网络流动数学模型. *石油学报*, 31(5): 815–824.
- 姚军, 王鑫, 王晨晨, 等, 2013. 碳酸盐岩储层参数对微观渗流的影响. *地球科学*, 38(5): 1047–1052.
- 尹光志, 李文璞, 许江, 等, 2016. 多场多相耦合下多孔介质压裂—渗流试验系统的研制与应用. *岩石力学与工程学报*, 35(增刊 1): 2853–2861.
- 袁迎中, 向祖平, 戚志林, 等, 2016. 基于 PEBI 网格的离散裂缝油藏数值模拟研究. *水动力学研究与进展*, 3(31): 379–386.
- 曾凡辉, 程小昭, 郭建春, 2016. 裂缝面非均匀流入的低渗透油藏压裂水平井非稳态产量计算. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(4): 1353–1358.
- 张浩, 康毅力, 陈景山, 等, 2007. 储层裂缝宽度应力敏感性可视化研究. *钻采工艺*, 30(1): 41–43.
- 张浩, 康毅力, 陈一健, 等, 2004. 岩石组分和裂缝对致密砂岩应力敏感性影响. *天然气工业*, 24(7): 55–57.
- 张华强, 2011. 基于非线性渗流的低渗裂缝性油藏数值模拟研究(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学.
- 张海勇, 何顺利, 栾国华, 等, 2014. 超低渗透裂缝介质储层应力敏感性定量研究. *岩石力学与工程学报*, 33(增刊 1):

3349—3354.

张睿, 宁正福, 张海山, 等, 2016. 裂缝性致密储层应力敏感机理新认识. 天然气地球科学, 27(5): 918—923.

张芮菡, 2015. 基于有限元—有限体积方法的裂缝性油藏数值模拟研究(硕士学位论文). 成都: 西南石油大学.

张仕强, 焦棣, 罗平亚, 等, 1998. 天然岩石裂缝表面形态描述. 西南石油大学学报(自然科学版), 20(2): 19—22.

张翔, 张伟, 靳秀菊, 等, 2016. 普光地区碳酸盐岩储层孔隙类型测井识别及孔渗关系. 地球科学, 41(12): 2119—2126.

赵海峰, 陈勉, 金衍, 等, 2015. 裂缝性低渗储层应力敏感性的尺度模型. 物理学报, 3(1): 7—12.

庄园, 2014. 基于数字化表征的酸蚀裂缝导流能力研究(硕士学位论文). 成都: 西南石油大学.

《地球科学》

2017 年 9 月 第 42 卷 第 9 期 要目预告

西藏班公湖—怒江成矿带荣嘎斑岩型钨矿床的发现及意义	郑有业等
西藏玉龙铜矿带包买矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学	林 彬等
广西东平富 Ga 含锰岩系碳、氧同位素特征及意义	李启来等
内蒙古朱日和地区早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及其构造意义	钱筱嫣等
郯庐断裂带渤南段构造特征及其控盆作用	张 婧等
琼东南盆地西区梅山组海底扇岩相—地球化学特征及源区意义	尤 丽等
全球海水剖面 Fe 同位素组成的不均一性及其影响因素	王建强等
储层岩性控制下的绿泥石对硅质胶结的影响	孙小龙等
降雨诱发的地质灾害气象风险预警模型: 以云南省红河州监测示范区为例	李 芳等
鄂尔多斯盆地南部延长组时代划分及长 7 ³ 对印支 I 幕的响应	张 文等